

小波变换的开关电流技术 实现与应用

李 目 吴笑峰 著



科学出版社

小波变换的开关电流技术 实现与应用

李 目 吴笑峰 著

科 学 出 版 社

北 京

内 容 简 介

本书较为系统地介绍了小波变换的开关电流技术实现理论和方法及其应用。全书共 13 章,主要包括:小波变换的开关电流技术实现基础,小波变换的模拟滤波器综合理论,小波函数的时域和频域逼近,小波变换的单开关电流积分器实现,小波变换的级联和多环反馈开关电流小波滤波器实现,小波变换电路在心电图检测、电力系统谐波检测、模拟电路故障诊断和信号包络提取中的应用等。本书不仅涉及目前国内外模拟小波变换实现的最新研究成果,而且包括作者长期从事小波变换的开关电流技术实现理论与方法研究所取得的科研成果,内容丰富、深入浅出。

本书可作为高等院校电气工程、自动化、电子信息工程、通信工程和计算机科学与技术等相关专业研究生和高年级本科生的教学参考用书,也可以供相关领域的工程技术人员和科学研究工作者参考。

图书在版编目(CIP)数据

小波变换的开关电流技术实现与应用 / 李目, 吴笑峰著. —北京: 科学出版社, 2017. 3

ISBN 978-7-03-051878-1

I. ①小… II. ①李… ②吴… III. ①小波理论-应用-电流-技术 IV. ①O441.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 035558 号

责任编辑: 陈 婕 纪四穗 / 责任校对: 郭瑞芝

责任印制: 张 伟 / 封面设计: 蓝 正

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 3 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2017 年 3 月第一次印刷 印张: 14 3/4

字数: 290 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

人们通常具有这样一个共性,就是在日常的生产、生活中观察事物时,往往不自觉地对有变化、无规律的现象产生浓厚兴趣,继而形成原始的探究冲动与欲望。如何从变化的事物中探究其规律,并由规律分析出事物的内在实质,是人们认识客观世界最朴实的辩证思维过程。微观定量地描述这种思维过程的利器和有效的方法之一是小波分析。小波分析是 20 世纪 80 年代后期兴起的应用数学分支,被认为是傅里叶分析发展史上里程碑式的进展。享有“数学显微镜”美誉的小波变换(WT)以其良好的时频局部化特性被广泛地应用于信号分析、图像处理、模式识别、语音分析、方程求解和分形力学等领域并取得了具有科学意义和应用价值的重要成果,而其新的理论与应用仍在不断探索中。随着小波分析理论的不断发展和应用领域的不断拓展,小波变换的硬件实现成为国内外学者和工程技术人员共同关注且亟须解决的问题。

小波变换的硬件实现主要有两个途径,即数字电路实现和模拟电路实现。采用数字电路如可编程逻辑器件(FPGA)和数字信号处理器(DSP)等通用器件实现小波变换的研究较多,设计实现过程相对简单,相关技术也比较成熟。由于模拟电路实现小波变换在功耗、体积和实时性方面具有明显优势,小波变换的模拟电路实现成为当前研究的主要方向。在模拟电路实现小波变换中,方法主要有两种,即时域法和频域法。时域法是基于小波变换定义,设计相应单元电路实现小波变换,该方法中单元电路设计较复杂,特别是小波函数发生器设计较困难。当前的主流方法是频域法,即通过设计冲激响应为不同尺度的小波函数或小波逼近函数的模拟滤波器组实现小波变换,该方法主要包括两个步骤,即小波函数逼近和小波滤波器设计。其中,小波函数逼近是为了获得可电网络综合实现的系统传递函数,研究高精度的逼近算法成为其主要发展方向;小波滤波器设计的主要任务是滤波器结构设计和滤波器电路设计。研究灵敏度低、功耗小、动态范围大、非理想性影响小和电路结构简单的小波滤波器成为主要目标。开关电流(SI)作为一种新的模拟取样数据信号处理技术,具有电路结构简单、无需运算放大器、求和运算容易、与数字 CMOS 工艺完全兼容且时间常数由元件参数比和时钟频率控制等特点,现已成为模拟滤波器设计实现中的重要研究课题。因此,采用开关电流滤波器实现小波变换成为当前模拟小波变换研究的热点。

本书的内容是作者近年来在小波变换的开关电流技术实现与应用方面所取得科研成果的归纳与总结,主要利用函数逼近算法、开关电流技术和模拟滤波器设计

理论,围绕模拟小波变换实现过程中小波函数逼近和小波滤波器设计及模拟小波变换应用进行研究与探讨。希望本书可以为读者提供有关小波变换的开关电流技术实现理论与方法学习方面的参考。本书共 13 章,其中,第 1 章简要介绍模拟小波变换的研究意义及研究概况;第 2 章主要介绍小波变换的开关电流技术实现基础;第 3 章介绍小波变换的模拟滤波器综合理论;第 4 章研究小波函数的时域逼近方法;第 5 章研究小波函数的频域逼近方法;第 6 章研究小波变换的单开关电流积分器实现方法;第 7 章研究小波变换的级联开关电流小波滤波器实现方法;第 8 章研究小波变换的多环反馈开关电流小波滤波器实现方法;第 9 章研究小波变换电路在心电图检测中的应用;第 10 章研究小波变换电路在电力系统谐波检测中的应用;第 11 章研究小波变换电路在模拟电路故障诊断中的应用;第 12 章研究小波变换电路在信号包络提取中的应用;第 13 章总结全书研究成果,并对进一步研究方向进行探讨和展望。

作者的研究工作和本书的出版得到了国家自然科学基金(61404049、61274026)、湖南省教育厅优秀青年基金(14B060)、湖南科技大学科学研究基金(E51525)和广西精密导航技术与应用重点实验室基金(DH201512)等项目的资助,在此表示衷心的感谢。同时对关心和指导本书出版的合肥工业大学何怡刚教授,桂林电子科技大学李海鸥教授,湖南科技大学周少武教授、谭文教授、王俊年教授、吴笑峰教授、席在芳副教授、吴亮红博士表示由衷的谢意。

小波分析和模拟电路设计方面的理论与应用正在蓬勃发展,这些领域中的许多理论技术和方法还不完善,小波变换的开关电流技术实现与应用研究领域中还有很多理论与工程技术问题需要进一步深入探索与研究,加之作者水平有限,书中疏漏或不足之处在所难免,恳请专家和读者批评指正。

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 模拟小波变换的研究意义	2
1.3 模拟小波变换的研究概况	6
1.4 本书的主要内容与结构安排	12
参考文献	15
第 2 章 小波变换的开关电流技术实现基础	21
2.1 小波变换理论基础	21
2.1.1 小波变换的产生	21
2.1.2 小波变换的定义	22
2.1.3 小波基函数的性质与分类	24
2.1.4 小波基函数的选择	26
2.2 开关电流技术基础	26
2.2.1 开关电流积分器	27
2.2.2 开关电流微分器	29
2.2.3 开关电流双线性积分器	31
2.3 模拟滤波器综合基础	33
2.3.1 高阶级联型滤波器综合法	34
2.3.2 高阶多环反馈型滤波器综合法	35
2.4 本章小结	41
参考文献	42
第 3 章 小波变换的模拟滤波器综合理论	44
3.1 引言	44
3.2 小波变换的模拟滤波器实现原理	44
3.3 小波变换的模拟滤波器设计方案	45
3.4 小波变换的模拟滤波器实现步骤	48
3.5 本章小结	56
参考文献	56

第4章 小波函数的时域逼近	58
4.1 引言	58
4.2 小波函数逼近理论	59
4.3 实小波的傅里叶级数逼近法	63
4.3.1 傅里叶级数逼近模型	63
4.3.2 实小波逼近实例	64
4.4 实小波的时域通用逼近法	65
4.4.1 实小波的时域逼近模型构造	65
4.4.2 差分进化算法及其改进	68
4.4.3 实小波逼近实例	71
4.5 复小波的时域通用逼近法	74
4.5.1 复小波的时域逼近模型构造	74
4.5.2 多目标优化差分进化算法	76
4.5.3 复小波逼近实例	78
4.6 时域逼近中关联参数选择问题	81
4.7 本章小结	82
参考文献	83
第5章 小波函数的频域逼近	85
5.1 引言	85
5.2 函数频域逼近理论	85
5.3 函数链神经网络逼近法	86
5.3.1 函数链神经网络	86
5.3.2 实例验证	87
5.4 小波频域函数拟合法	90
5.4.1 频域函数拟合法	90
5.4.2 实例验证	91
5.5 矩阵奇异值分解逼近法	93
5.5.1 奇异值分解逼近	93
5.5.2 实例验证	94
5.6 本章小结	96
参考文献	96
第6章 小波变换的单开关电流积分器实现	99
6.1 引言	99
6.2 小波函数容许条件及稳定性	100

6.3 单积分器小波滤波器设计与仿真	102
6.4 实例验证	106
6.5 本章小结	107
参考文献	107
第7章 小波变换的级联开关电流小波滤波器实现	109
7.1 引言	109
7.2 串联结构开关电流小波滤波器设计	110
7.2.1 奇数阶和偶数阶实小波逼近函数求解	110
7.2.2 串联结构开关电流实小波滤波器设计	114
7.2.3 串联结构开关电流复小波滤波器设计	124
7.3 并联结构开关电流小波滤波器设计	127
7.3.1 小波函数逼近模型及求解	127
7.3.2 并联结构开关电流 Marr 小波滤波器设计	128
7.4 本章小结	131
参考文献	131
第8章 小波变换的多环反馈开关电流小波滤波器实现	133
8.1 引言	133
8.2 多环反馈结构实小波滤波器设计	134
8.2.1 基于反相微分器的多环反馈实小波滤波器设计	134
8.2.2 基于双线性积分器的精简结构实小波滤波器设计	144
8.3 多环反馈结构复小波滤波器设计	149
8.3.1 复小波滤波器的共享结构设计	151
8.3.2 求模和相位电路	152
8.3.3 复小波滤波器设计与仿真分析	153
8.4 本章小结	160
参考文献	161
第9章 小波变换电路在心电图检测中的应用	163
9.1 引言	163
9.2 小波变换检测 QRS 波的原理和步骤	164
9.3 QRS 波的开关电流小波变换电路检测	166
9.3.1 基本结构与原理	166
9.3.2 开关电流小波变换电路设计	167
9.3.3 模极大值检测电路	173
9.3.4 实例验证	174

9.4 本章小结	177
参考文献	178
第 10 章 小波变换电路在电力系统谐波检测中的应用	180
10.1 引言	180
10.2 电力系统谐波的小波变换检测原理	182
10.3 基于开关电流小波变换电路的谐波检测	184
10.3.1 Morlet 小波函数时域逼近	185
10.3.2 Morlet 小波滤波器传递函数求取	187
10.3.3 开关电流 Morlet 小波滤波器设计与仿真	188
10.3.4 实例验证	192
10.4 本章小结	193
参考文献	194
第 11 章 小波变换电路在模拟电路故障诊断中的应用	196
11.1 引言	196
11.2 基于小波变换电路的模拟电路故障诊断原理	198
11.3 用于故障特征提取的小波变换电路设计	199
11.4 基于分数阶小波变换电路的故障特征提取	203
11.4.1 小波能量故障特征提取	203
11.4.2 实例验证	204
11.5 本章小结	208
参考文献	208
第 12 章 复小波变换电路在信号包络提取中的应用	210
12.1 引言	210
12.2 解析小波变换	210
12.3 信号包络提取原理	211
12.4 复解析分数阶小波变换电路设计	213
12.5 基于复解析小波变换电路的语言信号包络提取	218
12.5.1 复解析小波变换电路的提取语音包络原理	218
12.5.2 实例验证	219
12.6 本章小结	220
参考文献	220
第 13 章 结束语	222

第 1 章 绪 论

1.1 引 言

随着科学技术的飞速发展,人类社会已进入信息时代。实时获取、传输和交换信息成为当今人们重要的社会活动和促进经济发展的重要动力,同时,信息技术的水平也成为衡量一个国家或地区经济发展程度的重要指标。信号是承载信息的载体^[1,2],人们需要获得信息,首先需要获取信号,然后采用合适的方法对信号进行分析和处理,提取其中的有用信息^[3]。“横看成岭侧成峰,远近高低各不同”,人们通过从不同角度认识和分析信号达到认识客观世界的规律与本质并使之能被科学利用的目的。伴随着信息技术和计算机技术的快速发展,信号处理技术被越来越广泛地应用于科学研究、技术开发、工农业生产、国防和国民经济的各个领域。与此同时,为了适应科学技术的日益进步和满足不断增长的应用需求,信号处理技术自身也在不断地完善和发展,新的信号分析理论和技术不断涌现。众所周知,信号分析方法是寻找一种简单有效的变换,使信号包含的重要特征在变换域内显现出来^[4]。其中,最基本的信号分析方法为傅里叶变换(Fourier transform, FT),它将信号展开成一系列不同频率正弦信号的线性叠加,获得信号不同频率成分的强弱和能量在频率域的分布。经过几十年的发展,从数学角度来看,傅里叶变换已有丰富的内容和许多行之有效的方法。由于傅里叶变换的核函数是正弦函数,它在时域上是无限的而非局部的,不能同时在时-频域对信号进行分析,反映的是信号的整体特征,在时域和频域上的分辨率是不变的,所以傅里叶变换只适合于处理平稳信号。对于瞬变的、非平稳信号的分析,需要了解时域信号局部时段上所对应的局部频域特性,傅里叶变换的局限性就凸显出来。为此,在傅里叶分析的基础上,一系列新的信号分析理论和方法出现。其中,典型的有 Gabor 变换、短时傅里叶变换(short time Fourier transform, STFT)、时频分析等。虽然这些方法相对于传统傅里叶变换在时-频域局部分析能力上有所提高,但从本质上讲,它们还是属于单一分辨率的信号分析方法。鉴于以上原因,具有多分辨率分析特点的小波变换(wavelet transform, WT)^[4,5]应运而生。自此,一种在时间和频率都具有表征信号局部特性能力的理想数学工具诞生,它对信号进行处理时不但不会“一叶障目”,而且能够做到“管中窥豹,可见一斑”,被冠以“数学显微镜”的美誉,并迅速成为众多学科领域信号分析处理的主流工具。

小波分析的起源可以追溯到 20 世纪 10 年代。1910 年, Harr 最早提出规范正交基, 但当时并没有提出“小波”这个词汇, 所以, Meyer 认为小波分析萌芽期为 1930~1980 年。直到 1981 年, Stormbég 对 Harr 系进行了改进, 证明了小波函数的存在性。随后, 法国地球物理学家 Morlet 首次提出了“小波分析”的概念, 并对其做了大量创造性研究。1984 年, Morlet 在分析地震数据时提出将地震波按一个确定函数的伸缩、平移系展开, 并发展了连续小波变换的几何体系。1985 年, Meyer 等通过选取连续小波空间的一个离散子集, 得到一组离散的小波基, 并通过离散子集的函数, 恢复了连续小波函数的全空间。1986 年, Meyer 证明了小波正交系的存在。1987 年, Mallat 提出了以多分辨率分析为基础的 Mallat 算法, 取得了小波分析理论方面的突破性成果。1988 年, Daubechies 构造了具有紧支撑的有限光滑小波函数 db 小波簇, 同时, 她在美国 *Pure & Applied Mathematics* 杂志上发表了 87 页的长篇学术论文, 该论文被公认为是小波分析的经典纲领性文献。1992 年, Daubechies 出版了小波分析的学术性著作 *Ten Lectures on Wavelet*, 书中系统地论述了正交小波的特性、泛函空间的小波刻画和正交小波基逼近通论及技巧等问题, 在世界范围内产生了深远的影响, 由此将小波分析的理论发展与应用推向了高潮。小波变换属于一种时间和频率的局部变换, 其窗口形状、时间窗和频率窗都可以改变, 在时频域都具有表征信号局部特征的能力, 有效地克服了傅里叶变换和短时傅里叶变换的不足, 实现了对非平稳信号的多尺度细化分析。近年来, 各个领域的科学家和工程技术人员对小波分析理论的发展和实际应用研究表现出了极大的热情, 取得了许多令人瞩目的成就, 使其成为信号处理领域的前沿课题, 同时, 也催生了许多新课题和新的研究热点, 如快速小波变换、非常规小波变换、脊波变换和曲波变换等, 进一步促进了小波分析的快速发展。小波分析的发展历程充分体现了不同学科、不同研究领域学者的学术思想相互碰撞迸发出的“绚丽火星”。众多科学家、数学家和工程师共同创造的小波分析理论, 也充分反映了大科学时代不同学科领域之间相互渗透、相互融合、“你中有我、我中有你”的必然趋势。正是基于小波变换与应用不断发展这一理念, 本书对小波变换的模拟开关电流技术实现理论与方法及其应用进行一系列的探索与研究。为了便于更好地理解小波变换的开关电流技术实现与应用研究的目的和意义, 下面简要介绍小波变换硬件实现研究的背景和小波变换实现研究的现状。

1.2 模拟小波变换的研究意义

小波分析理论与应用是相辅相成、紧密联系的。不断发展的小波分析理论指导小波分析广泛应用于工程实际, 同时, 小波分析在各领域的应用又促进小波分析理论的发展。伴随着微型计算机的发展和普及, 传统的小波分析是在微型计算机

上结合软件来实现的,借助微型计算机上成熟的接口技术和日益人性化的编程软件,简单、快捷地实现对信号的小波分析与处理。然而,随着小波分析在工程应用领域的不拓展,从不同的角度对小波分析的实现方式和手段提出了新的要求,此时,传统的微型计算机结合软件方式的局限性也就暴露出来。一方面,小波分析技术已广泛地应用于生物医学信号处理、移动通信和工程信号检测等领域,而在这些领域中,小型化、低功耗和便携式的设备研制是重要的内容和主要发展方向。例如,植入式心脏起搏器、穿戴式脑电图分析仪、移动式心电和肌电检测仪、便携式谐波检测器、便携式故障诊断仪和移动通信设备等,系统功耗和体积是此类型设备需要考虑的关键因素,显然,微型计算机结合软件的小波分析实现形式不能满足功耗和体积的要求。另一方面,小波分析的应用已经涉及军事电子对抗与武器的智能化、计算机网络战中的信息隐藏、地震勘探数据处理、大型机械设备故障诊断、雷达和声呐信号分析等领域。以上特殊应用中,信号分析和处理的快速性与实时性是至关重要的。例如,迅速对敌方电磁信号做出反应并实施反制;实时检测网络中的隐藏信息,获取敌方情报;分辨分层的地层和矿床结构,处理地震勘探数据并准确发出预警;监测大型机械设备的运行状态,实时诊断故障,避免重大安全事故;分析捕获的雷达和声呐信号,快速确定目标位置和速度等。然而,由于小波变换的计算量大、运算时间长,微型计算机结合软件方式难以满足实时性需求。此外,传统小波变换实现形式不能制成一体化集成系统。随着微电子技术和集成工艺的发展,模数混合集成电路和系统芯片(system on chip, SoC)已成为当今集成电路发展的趋势,而传统小波变换实现方式与该潮流不相适应。综合以上几点可以看出,传统的小波分析实现形式已不能满足现实应用需求,亟待研究新的小波分析实现方法摆脱这种困境。近年来,国内外科学家和工程技术人员正在努力寻求一种简便的方法进行小波变换的计算,试图避免复杂、烦琐的数学计算,满足现实需求。

针对小波变换的低压、低功耗、实时性和可集成化的应用需求,研究小波变换的硬件电路实现方法成为必然趋势。目前,小波变换的硬件实现电路主要分为两大类:数字电路和模拟电路。相比模拟电路实现小波变换,数字电路实现小波变换的设计比较简单,可借用现有的可编程逻辑器件(FPGA)或数字信号处理器(DSP),结合计算机软件来实现,可利用的成熟数字电路模块和子程序比较多,而且,数字系统在灵活性、可编程性、抗干扰性和可测性等方面表现优良,因此,近十年来,小波变换的数字电路实现取得了大量卓有成效的研究成果^[6-14],成为国内外小波变换硬件实现的主要方法。然而,随着小波变换应用领域的不断拓展,一些新的应用环境对小波变换实现提出了新的、更高的要求,也对数字电路实现小波变换的方式提出了新的挑战。例如,小波变换以其良好的时频域局部特性,被广泛地应用于生物医学信息处理,成为生物医学与信息技术的交叉学科研究中十分活跃的课题。生产的医疗电子设备采用小波变换对采集的医学信号进行分析和处理,获

取医学信息,指导临床诊治。其中,典型的设备有可植入式心脏起搏器、移动式心电图检测仪和穿戴式脑电检测仪等。另外,小波变换也被应用于工程信号检测设备中,用于检测工程信号中的奇异信号,常见的设备如用于电力系统谐波分析的便携式谐波检测器、对设备故障进行检测与诊断的手持式故障诊断仪等。这些设备和仪器的共同点是微型化和便携式,因此它们都不能携带很大的电源或不便于充电。为了延长其使用时间,减小其功耗是首要面对的问题。于是,采用芯片面积小、功耗低的电路成为解决能耗问题、延长其工作时间最直接的方法。然而,面对模拟信号处理,数字电路实现小波变换时需要附加 A/D 器件,实现模拟信号到数字信号的转换,此时,系统的体积和功耗随之增加。为了定量地比较模拟电路和数字电路之间的功耗,2006 年 Haddad^[15]对植入式心脏起搏器前端部分中模拟与数字传感放大电路的功耗进行了对比研究,其中,模拟传感放大电路主要由模拟带通滤波器组成,数字传感放大电路主要由 A/D 变换器和数字滤波器构成。研究结果表明,在不计数字滤波器功耗的情况下,数字传感放大电路的功耗(即 A/D 变换器的功耗)远高于模拟传感放大电路的功耗。同时,考虑到集成电路工艺和技术的发展,作者也对未来 A/D 器件的功耗变化进行了预测,预见在未来几十年内,模拟传感放大电路相对数字传感放大电路的功耗将仍然保持强劲优势。由此看来,小波变换的数字电路实现方式不能满足低功耗和微型化设备发展的需求,也制约了小波变换在相关领域应用的进一步发展。此外,由于 A/D 器件的存在,模拟信号与数字信号的转换过程中容易产生波形畸变和信号传输延迟,降低系统的处理精度和速度。综合上述原因,研究小波变换的模拟电路实现技术具有重要的实际意义和应用价值,将对小波变换在低功耗、微型化和高频、高速电子设备中的应用起到推动作用。

模拟电路实现小波变换,首先需要选择合适的模拟实现技术。本书拟采用滤波器技术实现小波变换,所以主要分析模拟滤波器的选型问题。其原则是选择低压、低功耗、高速率、宽频带、结构简单和易于模数混合集成的滤波器类型。滤波器技术从 20 世纪 20 年代开始,至今已走过了近百年的历程。随着微电子技术和集成工艺的进步,滤波器设计这个古老的学科领域仍然生机盎然,保持长新和不断发展的势头。纵观滤波器的发展史可知,滤波器经历了从无源滤波器到有源滤波器两大发展阶段,而有源滤波器从不同角度又可细分为电压模滤波器和电流模滤波器、连续时间滤波器和离散时间滤波器等。最早的无源 RLC 滤波器具有噪声小、Q 值(品质因数)高的特点,但电感和电容体积大、重量大且无法集成^[16]。随后,有源 RC 滤波器在集成运算放大器出现后得到迅速发展,但不足也很明显。首先,电路需要大容量电容,不易集成,而大电阻又占用较大的芯片面积,使大规模集成面临很大困难,最致命的是与 MOS 集成工艺不兼容。其次,滤波器的特性参数与 RC 时间常数有关,但精准的集成电阻和电容难以实

现^[17]。为了解决大规模集成的问题,70年代,电压模式开关电容滤波器被提出^[18,19],它本质上属于取样数据系统,通过开关电容模拟电阻,使之能单片集成。由于电压模式开关电容滤波器开关电容的电路特性取决于电容的比值和时钟频率,而集成元件的比值可以做到很精确而不受制造工艺误差、温度和信号电平波动等因素的影响,自提出以来就得到了迅猛发展,在通信和信号处理系统中获得广泛应用。然而,随着模数混合信号集成电路的发展,要求系统的模拟电路部分具有标准数字 CMOS 集成工艺,但是,开关电容电路中需要设计特殊的双层多晶硅结构实现线性浮置电容,这种结构与标准数字 CMOS 工艺不兼容^[20]。另外,集成电路集成密度的日益加大,标准电源电压越来越低,开关电容上的最大电压摆幅也随之减小,从而减小了电路的最大动态范围,电路性能难以保证。开关电容和其他电压模电路在适应数字 CMOS 工艺技术上遇到了困难,使电流模技术重新复苏并焕发生机。不同于电压模电路以电压为信号变量,电流模电路以电流为信号变量,它可以解决电压模电路所遇到的一些难题,在速度、带宽和动态范围等方面获得了更加优良的性能。因此,在高频、高速信号处理领域,电流模式的电路设计方法正取代电压模式的传统设计方法,将现代模拟集成电路的发展和应用推进到一个新阶段。70~80年代,跨导线性电路^[21,22]、电流传输器电路^[23]、跨导电容电路^[24,25]、对数域电路^[26,27]等电流模式连续时间电路相继被提出,在音频、视频及其他高速模拟系统中得到了广泛应用。然而,在离散时间电路应用中,电压模开关电容电路长期以来是唯一的选择,但开关电容电路与现代集成电路在低压、低功耗、低造价和集成工艺兼容性等方面的发展要求不相适应。所以,电流模式离散时间电路兴起成为必然。

1989年 Hughes 等^[28]提出了一种新的模拟取样数据信号处理技术,即开关电流技术,改变了长期以来开关电容电路是实现取样数据系统唯一选择的格局,一经问世就引起广泛关注并取得迅速发展。开关电流电路属于电流模取样数据信号处理电路,利用了 MOS 晶体管在其栅极开路时通过存储在栅极氧化电容上的电荷维持其漏极电流的能力。与同属离散时间系统的开关电容技术相比,开关电流电路以电流信号为处理对象,在集成电路工艺中的电源电压降低时,信号电流的动态范围不会因此受到直接影响。另外,开关电流电路不需要线性浮置电容,完全符合标准的数字 VLSI CMOS 工艺^[29-32],并且,开关电流电路没有运算放大器,不存在由于运算放大器的非理想性影响设计精度问题,电路结构也更简单,实现求和运算也更容易。特别重要的一点是,开关电流电路继承了开关电容电路中时间常数由元件参数比和时钟频率决定的优点,可通过控制晶体管的宽长比或时钟频率得到精确的滤波器膨胀系数,该特性非常有利于多尺度小波变换的实现。由此可见,开关电流电路设计实现小波变换是比较理想的选择,研究小波变换的开关电流技术实现将促进小波分析理论和小波变换应用的发展,同时,对开关电容电路、开关电

流电路和模数混合集成电路及系统芯片的设计与应用具有重要的理论意义和实际参考价值。

1.3 模拟小波变换的研究概况

随着小波分析理论与工程应用的结合日益紧密,小波变换已被广泛地应用于信号分析、图像处理、语言识别、数据压缩和故障诊断以及非线性科学等领域,成为众多学科共同关注的焦点^[4]。原则上讲,传统上使用傅里叶分析的地方,现在都可以用小波分析取代,因此,小波变换的硬件实现问题自然也就成为学者研究的热点课题。迄今,国内外小波变换的硬件实现已经取得了不少的研究成果。其中,数字电路实现小波变换方面的研究比较活跃,已有相当数量的研究成果被报道。相对而言,模拟电路实现小波变换的研究要滞后很多,其主要原因在于模拟小波变换电路的结构相对复杂得多,设计难度较大,模块电路通用性小,灵活性差;模拟电路设计时需要在速度、功耗、增益、精度和电源电压等多种因素间进行折中处理;模拟电路对噪声、串扰和其他干扰敏感得多;模拟电路的自动化设计程度比较低,使设计需要结合经验人工进行等,这些因素都限制了模拟小波变换电路的发展^[33]。但是,数字小波变换系统必须通过转换接口与外部世界联系,存在功耗、体积和实时性等方面的“瓶颈”,刺激了模拟小波变换的研究和发展。近 20 年以来,小波变换的模拟实现也取得了很大的进展,特别是模拟集成电路设计新理论和新技术的不断涌现以及人工智能技术的飞速发展,为模拟小波变换的进一步发展提供了新的契机,新理论与新技术的引入和不同学科知识的相互借鉴与交融,使新背景下的模拟小波变换研究呈现勃勃生机。

目前,按其实现原理来分,小波变换的模拟实现方法主要可分为两大类:时域法和频域法。为了更好地理解和区分这两类方法,首先给出小波变换的数学定义:设 $\psi(t)$ ($\psi(t) \in L^2(\mathbf{R})$) 为小波函数或小波基,信号 $f(t)$ 在尺度 $a \in \mathbf{R}$ 和位移 $b \in \mathbf{R}^+$ 时的连续小波变换为

$$W_f(a, b) = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \psi^* \left(\frac{t-b}{a} \right) dt, \quad a > 0 \quad (1.1)$$

式中, $\psi^*(t)$ 为 $\psi(t)$ 的共轭。

1. 时域实现法

由式(1.1)可以看出,时域连续小波变换实现系统包括三个基本单元:小波函数发生器、乘法器和积分器。其系统结构如图 1.1 所示。小波函数发生器产生不同尺度和位移的小波函数,并与输入信号经乘法器相乘,最后送到积分器进行积分运算实现连续小波变换。



图 1.1 时域连续小波变换系统结构图

基于时域实现原理,1995 年 Moreira-Tamayo 和 de Gyvez^[34]首次提出了基于幅度调制技术的连续小波变换电路实现方法。利用信号调制原理产生小波链,其小波链类似于不同尺度和位移的小波簇,然后将小波链和输入信号相乘后再进行积分运算实现连续小波变换。由于调制过程中不能自动产生不同尺度和位移的小波簇,所以实现时需要不断调整主频,但是主频的变化会改变小波函数的幅度和低通滤波器的截止频率。因此,在实际应用时需要设计一组不同主频的单元电路,其设计过程和电路结构变得复杂。

1998 年,金吉成和田逢春^[35]利用开关电容滤波器的特性构造了一个小波函数发生器。该系统结合了数字存储器、D/A 转换器和开关电容滤波器,能够方便地产生不同尺度的小波信号,为实现小波变换提供基本单元。后来,胡沁春等^[36]采用开关电流电路设计实现了连续小波变换。利用开关电流技术设计时域法中各单元电路,丰富和发展了时域法实现连续小波变换的方法。

从总体上分析,时域法实现连续小波变换具有原理简单、运算速度快的特点,但是,由于系统需要的功能单元电路比较多,包括分频器、低通滤波器、乘法器和积分器等,而且对每个单元电路的性能要求比较高,否则得不到预期结果,所以,系统的设计难度大,单元电路结构比较复杂。近些年来,时域法实现小波变换的研究比较缓慢,取得的突破性研究成果比较少。

2. 频域实现法

时域法是以连续小波变换的时域定义为基础的,而连续小波变换的频域法是以其频域定义为基础的。设输入信号 $f(t)$ 的傅里叶变换为 $F(\omega)$,小波函数 $\psi(t)$ 的傅里叶变换为 $\hat{\psi}(\omega)$,则 $f(t)$ 的连续小波变换频域表达式为

$$\text{WT}_f(a, b) = \frac{\sqrt{a}}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \hat{\psi}^*(a\omega) e^{i\omega b} d\omega \quad (1.2)$$

由式(1.2)可以看出,信号的连续小波变换在频域可看成频率特性为 $\hat{\psi}(\omega)$ 且品质因数 Q 恒定的不同尺度带通滤波器对信号进行滤波处理后的结果。频域连续小波变换系统结构图如图 1.2 所示。

随着滤波器技术的不断发展和日趋成熟,基于滤波器的频域法实现小波变换研究取得了可喜的成绩。频域法是根据小波变换在频域相当于一组不同中心频率的带通滤波器在不同尺度下对信号进行滤波处理,因此,小波变换实现转化成了恒

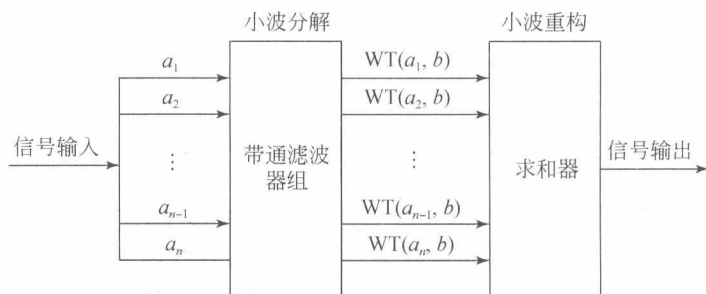


图 1.2 频域连续小波变换系统结构图

Q 值的带通滤波器组设计问题, 有效地避开了时域法中不同功能单元电路的设计。这种实现方式生动地体现了信号处理中时域和频域可交替使用的思路。由于频域法实现小波变换的设计方案比较多、灵活性强, 可实现的小波函数种类也较多, 且相应滤波器设计技术成熟, 所以, 相关研究比较活跃, 取得的成果也比较多。

1993 年 Edwards 和 Godfrey^[37] 首次提出了基于复解调技术的连续小波变换实现方法, 并研制了模拟音频小波变换芯片。从此, 开启了频域法实现连续小波变换的研究热潮。该方法的基本原理是首先通过高斯带通滤波器组对信号进行滤波, 然后对滤波后的各个频带按照其采样频率与带宽成正比的原则进行采样实现小波变换。为了避开相对复杂的不同中心频率和带宽的恒 Q 值带通滤波器设计, 在信号滤波器之前, 将带通滤波器的频谱搬移至低频段, 用频率特性相似的低通滤波器代替带通滤波器, 滤波后又将信号频谱搬回至原中心频率处, 并将各部分求和实现信号重构。通过巧妙地采用频谱搬移方式, 将复杂的恒 Q 值带通滤波器设计转化为简单的低通滤波器设计, 有效地简化了系统设计。

随后, Edwards 和 Cauwenberghs^[38] 在原来研究的基础上, 提出用模拟反向器和多路传输器替代乘法器增大电路的线性动态范围, 提高了小波变换电路的性能。Chen 和 Harris^[39] 利用 Laguerre 存储器构造了 Laguerre 小波, 并采用 Laguerre 结构低通、高通和全通滤波器设计实现了 Laguerre 小波变换, 频率范围达 $10\text{Hz} \sim 20\text{kHz}$, 适合于音频信号处理。Justh 和 Kub^[40] 利用 CMOS 器件设计实现了连续小波变换, 其主要设计思路是采用 MOSFET 作为电阻对压控振荡器 (VCO) 的控制电压进行分压, 达到控制振荡频率的目的, 并通过给 MOSFET 提供可调偏流, 实现环路增益补偿。国内学者黄清秀等^[41]、黄娇英等^[42]、戴媛媛等^[43] 和胡沁春等^[44] 先后分别采用对数域电路和开关电流电路设计实现了连续小波变换, 将基于频域法的小波变换电路设计进行了推广。

以上小波变换实现方法中都没有直接设计带通滤波器, 而只设计了相应的低通滤波器, 其主要原因是满足频率特性要求的低通滤波器易于实现。虽然上述小波变换实现方法在一定程度上推动了模拟小波变换的研究, 也为小波变换的模拟